Edição: 04/2009
A partir de 15 anos

REAÇÕES NUCLEARES:

ESTRELAS

Presidente da República
Luiz Inácio Lula da Silva

Ministro de Estado da Ciência e Tecnologia
Sergio Machado Rezende

Secretário - Executivo do Ministério da Ciência e Tecnologia
Luiz Antônio Rodrigues Elias

Subsecretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa
Carlos Oití Berbert

Diretor do ON
Sergio Luiz Fontes

Observatório Nacional - MCT
Rua General José Cristino,77
Cep:20921-400
Rua General Bruce, 586
CEP 20921-030 São Cristóvão
Rio de Janeiro - RJ Brasil
Fone: 21 2580 6087
PABX:21 3504 9100
FAX: 21 2580 6041

Criação e desenvolvimento da revista
Divisão de Atividades Educacionais - DAED
Dr. Antares Kleber (Idealizador das séries de revistas)
Luzia Ferraz Penalva Rite
Thiago Moeda Sant'Anna
Rodrigo Cassaro Resende
Edilene Ferreira
Vanessa Araújo Santos (Estagiária)
Igor Cordeiro de Souza Jardim (Estagiário)

Revisão Técnico-Científica
Dr. Carlos Henrique Veiga (Chefe da Divisão de Atividades Educacionais)
Dr. Dalton de Faria Lopes (Pesquisador da Coordenação de Astronomia e Astrofísica)

Programação Visual
Edilene Ferreira

Caros Leitores,

Esta série de revistas, editadas pela Divisão de Atividades Educacionais do Observatório Nacional/MCT, projeto apoiado pelo Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, tem como meta a difusão de informações gerais sobre os vários temas da Astronomia. Levar o leitor ao pensamento científico, à imaginação e à criação, atraindo-o a pesquisar os conceitos aqui abordados ou sugeridos, é um dos objetivos desta publicação.

Boa Leitura!
Divisão de Atividades Educacionais (DAED)

A revista já está utilizando as alterações introduzidas na ortografia da língua portuguesa.

As informações que constam nesta revista foram atualizadas até a data desta edição.

Cercados de reações nucleares

As estrelas

Todos os dias, logo de manhã, somos saudados pelo brilho do Sol. Essa é a estrela mais próxima de nós, aquela que, por meio de sua energia, faz com que possa existir vida na Terra. Diariamente sentimos, de alguma forma, a energia emitida pelo Sol. Basta irmos para o lado ensolarado de uma rua que sentiremos, imediatamente, a ação da energia solar sobre a nossa pele, sob a forma de calor.

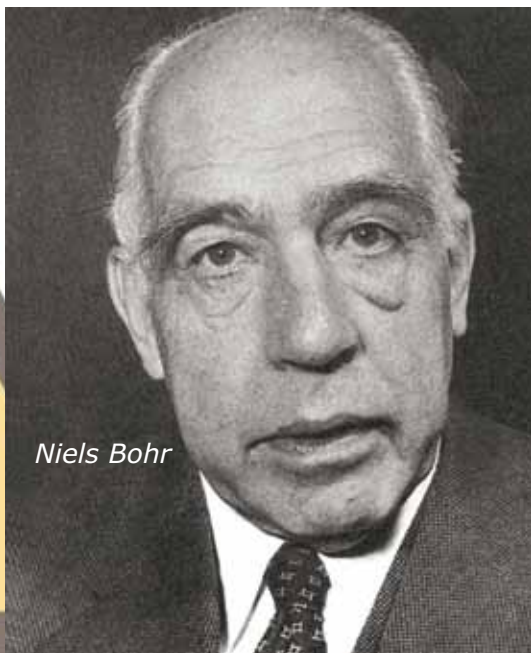
Se permanecermos muito tempo expostos ao Sol, ou seja, à sua energia, certamente teremos problemas no dia seguinte; as chamadas queimaduras solares.

Não apenas o Sol, mas todas as estrelas que vemos, pontilhando o céu, em uma noite sem nuvens, mostram que a liberação de energia é algo contínuo na vida delas. Logo, vem à mente várias perguntas: *que energia é essa? Como ela se forma?*

Para entendermos como isso ocorre, precisamos conhecer, um pouquinho, a estrutura do átomo.

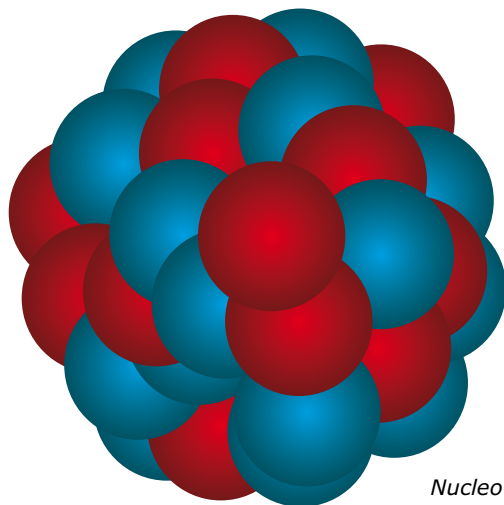
O que é o átomo?

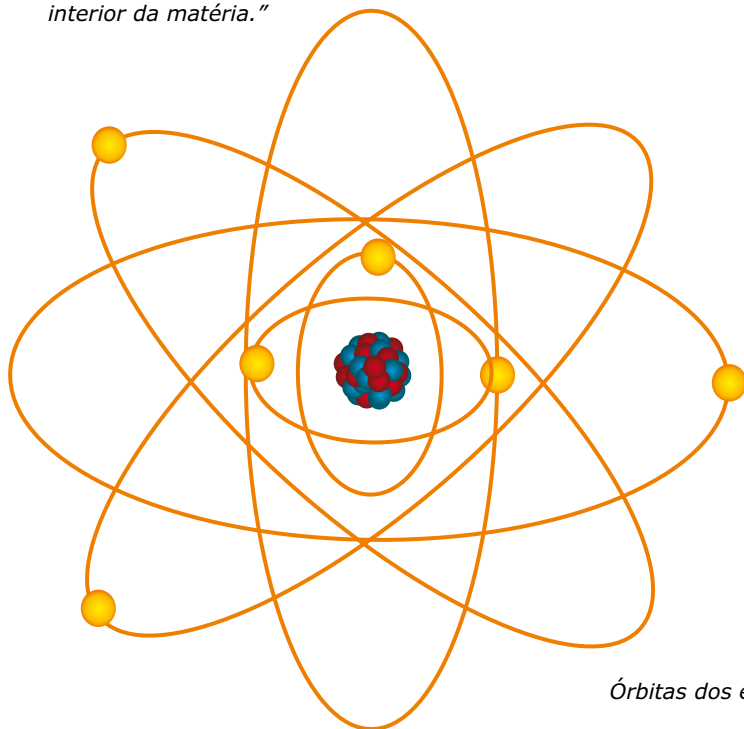
Os blocos construtores básicos da matéria "normal", aquela que vemos espalhada por todo o Universo, são os átomos. Os fenômenos que ocorrem no interior da matéria, ou melhor ainda, no interior dos átomos, têm aspectos muitíssimo particulares, característicos e, algumas vezes surpreendentes. A física que ocorre bem no interior da matéria, na região que chamamos de “nível microscópico” ou “nível atômico”, é muito diferente daquela, cujas consequências, estamos acostumados a ver no nosso mundo macroscópico, aquele cujas escalas vão do milímetro aos milhares e milhares de quilômetros. Entretanto, embora a matéria "normal" seja composta de átomos e moléculas, a maioria dela não se apresenta desta forma no Universo e sim, na forma de “plasma”, um gás formado por partículas carregadas, principalmente de prótons e de elétrons.

O modelo de Bohr para o átomo

Niels Bohr

Em 1915, o prêmio Nobel dinamarquês, Niels Bohr, apresentou um modelo que descrevia o átomo, e que foi chamado de "átomo planetário" ou "modelo de Bohr".

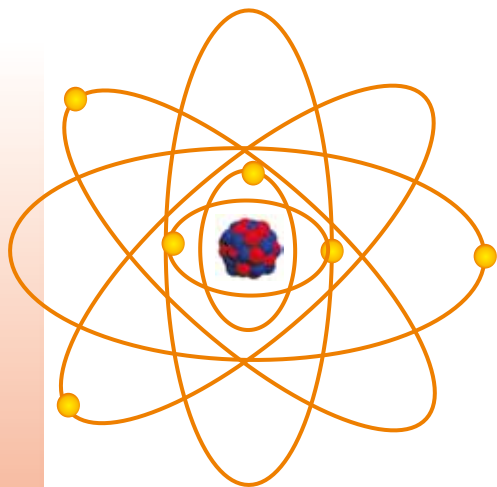
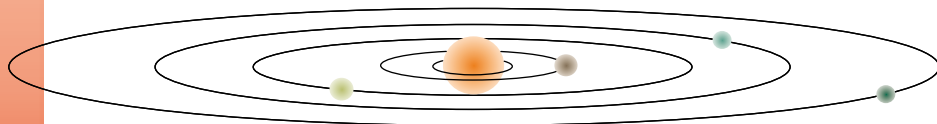
O modelo do átomo, proposto por Bohr, não é inteiramente correto e não representa a visão atual que os físicos possuem sobre o interior da matéria.

No entanto, ele tem vários aspectos que são aproximadamente corretos, é mais fácil de ser entendido e é plenamente satisfatório para uma grande parte da nossa discussão. No modelo atômico proposto por Bohr, partículas chamadas nêutrons e prótons, ocupam uma região central e densa do átomo, chamada núcleo atômico. Em torno desse núcleo outras partículas, os elétrons, descrevem órbitas. A atração elétrica entre os prótons (carga elétrica positiva) e os elétrons (carga elétrica negativa) é um dos processos que dá estabilidade ao átomo, mantendo-o unido.

Nucleo do átomo de Bohr

"O modelo do átomo, proposto por Bohr, não é inteiramente correto e não representa a visão atual que os físicos possuem sobre o interior da matéria."

Órbitas dos elétrons

Esta descrição se assemelha, em alguns aspectos, àquela que fazemos do nosso Sistema Solar, onde os planetas estão em órbita, em torno do Sol, e a força da gravidade mantém o conjunto em equilíbrio.

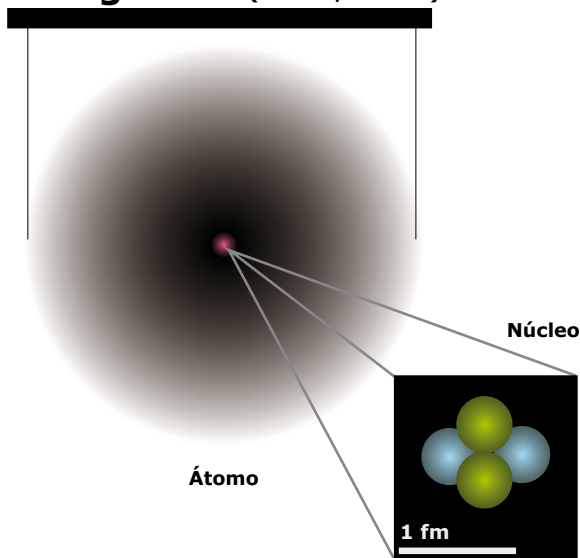
No entanto, fazer uma analogia, sem restrições, entre o Sistema Solar e o átomo de Bohr não é correto, uma vez que os planetas estão em órbitas que, aproximadamente, permanecem confinadas a um plano (o plano da eclíptica) enquanto que, no caso do átomo, as órbitas dos elétrons não estão confinadas a nenhum plano. Além disso, os planetas são mantidos em órbita graças à força gravitacional, enquanto que os elétrons são mantidos circulando, em torno do núcleo graças à força eletromagnética.

Abaixo temos uma comparação entre o Sistema Solar e o átomo de Bohr.

"As órbitas dos elétrons não estão confinadas a nenhum plano. Note que eles se deslocam em qualquer direção."

"Os planetas estão em órbitas que, aproximadamente, permanecem confinadas a um plano (o plano da eclíptica)."

Existem outros aspectos, mais complexos, que anulam completamente qualquer tentativa de analogia entre o Sistema Solar e o átomo de Bohr. Além disso, está completamente errado, sob o ponto de vista da física moderna, pensar que o átomo é formado por diminutas "bolinhas", às quais damos os nomes de prótons, nêutrons e elétrons.

Os novos conhecimentos, sobre o comportamento das partículas subatômicas, impossibilita qualquer analogia, séria, entre os constituintes atômicos e os planetas do Sistema Solar. O tamanho típico de um núcleo atômico é 10^{-13} centímetros, com os elétrons descrevendo órbitas a uma distância (raio) de aproximadamente:

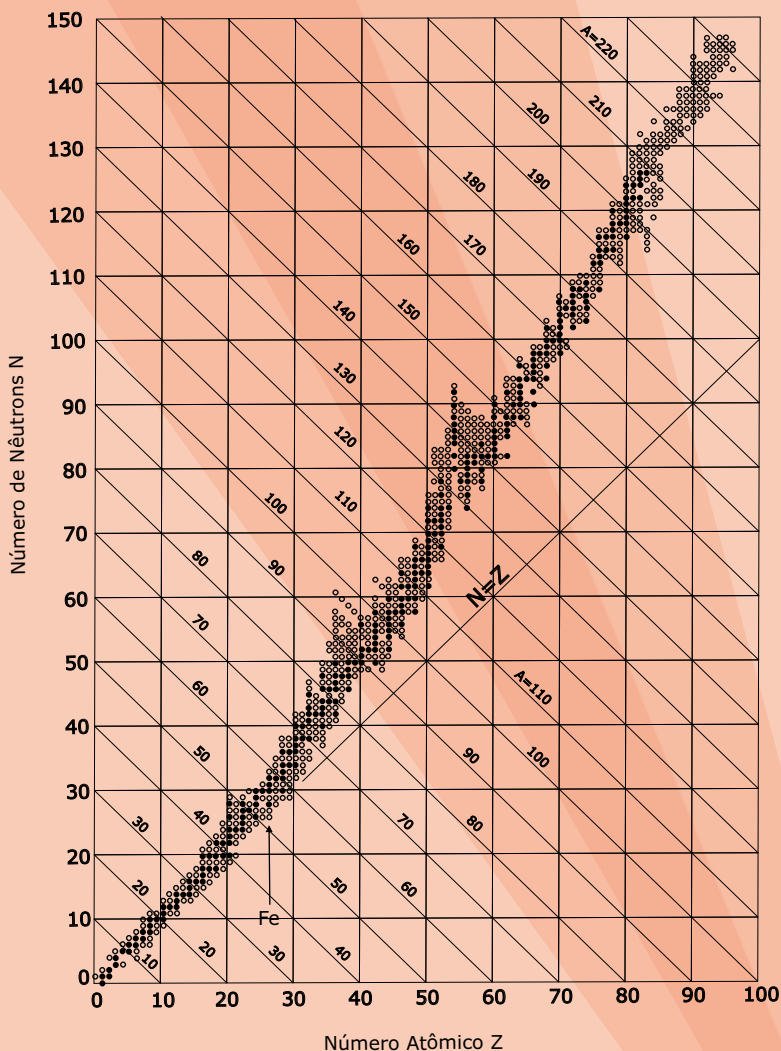
10^{-8} centímetros = 1 Ångstrom (1 Å).

Isto quer dizer que, o raio do núcleo, é cerca de 100.000 vezes menor do que o raio do átomo inteiro. Este dado é importante para que você tenha a noção correta de como a matéria é "vazia".

Outro ponto importante é que, para o estudo do interior da matéria, consideramos que é válido o princípio de que as partículas, de um determinado tipo, são indistinguíveis. Com isto queremos dizer que, um elétron é sempre igual a outro elétron. Não existem elétrons gordos ou magros, novos ou velhos. Nessa nossa descrição, aproximada, podemos considerar o elétron como sendo uma partícula puntiforme, sem extensão espacial, cujas propriedades intrínsecas são as mesmas para todos eles, independentemente da situação física em que ele se encontre.

Partícula	Símbolo	Carga Elétrica	Massa
Elétron	e^-	negativa ($1,60 \times 10^{-19}$C)	$9,11 \times 10^{-31}$ kg
Próton	p^+	positiva (igual à do elétron)	$1,67 \times 10^{-27}$ kg (cerca de 1836 vezes maior que a do elétron)
Nêutron	n°	sem carga	$1,68 \times 10^{-27}$ kg (quase igual à do próton)

A tabela acima nos mostra que, a maior parte da massa dos átomos reside nos prótons e nêutrons, que ocupam a região central mais densa do átomo, que é chamada de núcleo atômico ou, simplesmente, núcleo.

Se os átomos são formados por partículas com carga elétrica positiva (prótons) e com carga elétrica negativa (elétrons), qual é a sua carga total? Os átomos têm carga positiva ou negativa? Na verdade os átomos são eletricamente neutros, por que o número de elétrons carregados negativamente que ele possui, é exatamente igual ao número de prótons, carregados positivamente. Os nêutrons por não possuírem uma carga final, não participam nessa conta.

Mas, afinal, qual é a "missão" dos nêutrons no interior de um átomo? Experimentalmente, verifica-se que o número de nêutrons é, aproximadamente, igual ao número de prótons nos núcleos estáveis leves. No entanto, o número de nêutrons cresce rapidamente e é cerca de duas vezes maior do que o número de prótons, nos núcleos estáveis mais pesados.

É esse maior número de nêutrons que dá estabilidade ao núcleo do átomo, pois prótons não poderiam conviver, harmoniosamente, em um volume tão pequeno quanto a região nuclear (prótons possuem carga elétrica positiva e, portanto, se repeliriam). Veremos, mais tarde, que átomos pesados cujos núcleos são ricos em nêutrons, é que são os responsáveis pela ocorrência de processos nucleares no interior das estrelas. O número de prótons, que participam do núcleo de um determinado átomo, é chamado de número atômico e é representado pela letra Z.

A partir do fato de que os átomos, em geral, se apresentam eletricamente neutros, ou seja, não possuem carga elétrica resultante, o número de prótons no núcleo tem que ser igual ao número de elétrons, que estão em órbita em torno deste núcleo. Daí, podemos dizer que o número atômico nos dá o número de prótons no núcleo de um determinado átomo, ou o número de elétrons nas respectivas órbitas em torno desse núcleo.

O número total de prótons e nêutrons, que formam um determinado núcleo atômico, é chamado de número de massa do átomo e é representado pela letra A. Representando, com a letra N, o número de nêutrons, temos que o número de massa é dado por:

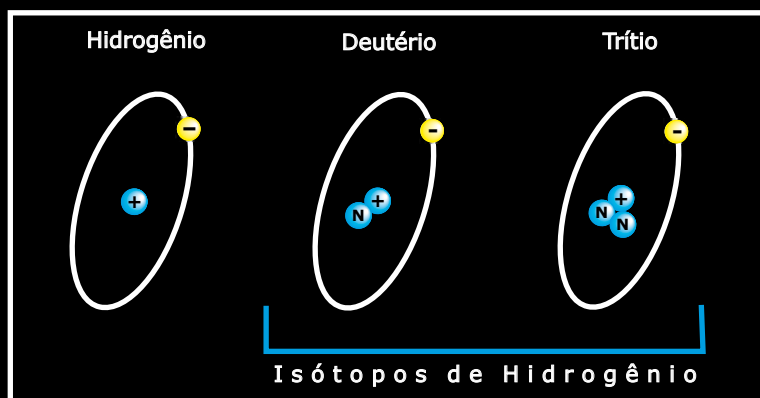
$$A = Z + N$$

Chamamos de isótopo de um elemento, o átomo que tem o mesmo número de prótons e, consequentemente, o mesmo número de elétrons que o elemento original, mas um número diferente de nêutrons. Assim, os isótopos de um elemento têm o mesmo número atômico Z, mas diferem em seus números de massa A.

Um mesmo elemento químico pode ter vários isótopos, todos eles diferindo apenas no número de nêutrons, N, que constituem seus respectivos núcleos. Por exemplo, o hidrogênio, o elemento químico que existe em maior quantidade no Universo, possui isótopos com nomes característicos.

O isótopo de massa 2, do hidrogênio, é chamado de deutério ou hidrogênio pesado, enquanto que, o isótopo de massa 3, é chamado de trítio ou trício.

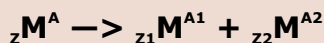
Observe que o núcleo do hidrogênio é formado por um próton apenas, o núcleo do deutério é formado por um próton e um nêutron e o do trítio, inclui um próton e dois nêutrons.

Fissão Nuclear e Fusão Nuclear

> Todos os átomos possuem energia. Existem vários processos capazes de fazer com que energia seja liberada por um átomo. Um desses processos é a chamada reação nuclear.
>
> Existem dois tipos de reações nucleares:
>
> ***Fissão Nuclear***
> ***e***
> ***Fusão Nuclear.***

Fissão Nuclear

Dizemos que ocorre uma fissão nuclear quando um núcleo atômico se divide em duas partes.

Vamos representar, com a letra M, qualquer elemento químico da tabela periódica, sendo que suas propriedades são definidas pelo valor de seus números atômico Z e de massa A. Considere agora um elemento qualquer M, com número atômico Z e número de massa A. Sua fissão nuclear seria representada por:

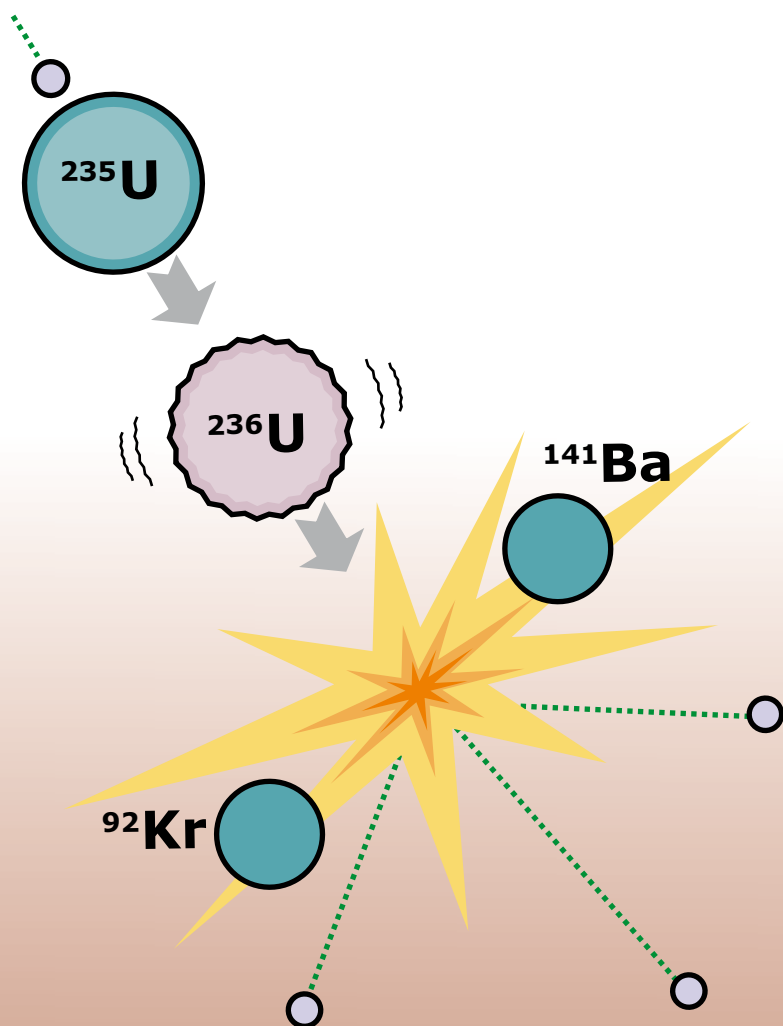
$$_{Z}M^{A} \longrightarrow {}_{Z1}M^{A1} + {}_{Z2}M^{A2}$$

onde

$$Z=Z1+Z2 \quad \text{e} \quad A=A1+A2$$

Veja que, nesse caso, o núcleo atômico de um elemento químico M, com número atômico Z (número de prótons existente no núcleo do átomo) e com número de massa A (número de prótons somado com o número de nêutrons existentes no núcleo do átomo) é dividido em dois outros núcleos M, diferentes, com números atômicos Z1 e Z2 e números de massa A1 e A2, respectivamente.

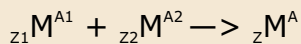
Note que o número atômico inicial Z é igual a Z1 + Z2 e o número de massa inicial A é igual a A1 + A2.

Repare que a fissão nuclear só ocorre com núcleos de elementos pesados, pois só eles têm condição de se dividir em núcleos mais leves. Para realizar esse processo é necessário incidir nêutrons contra um núcleo pesado.

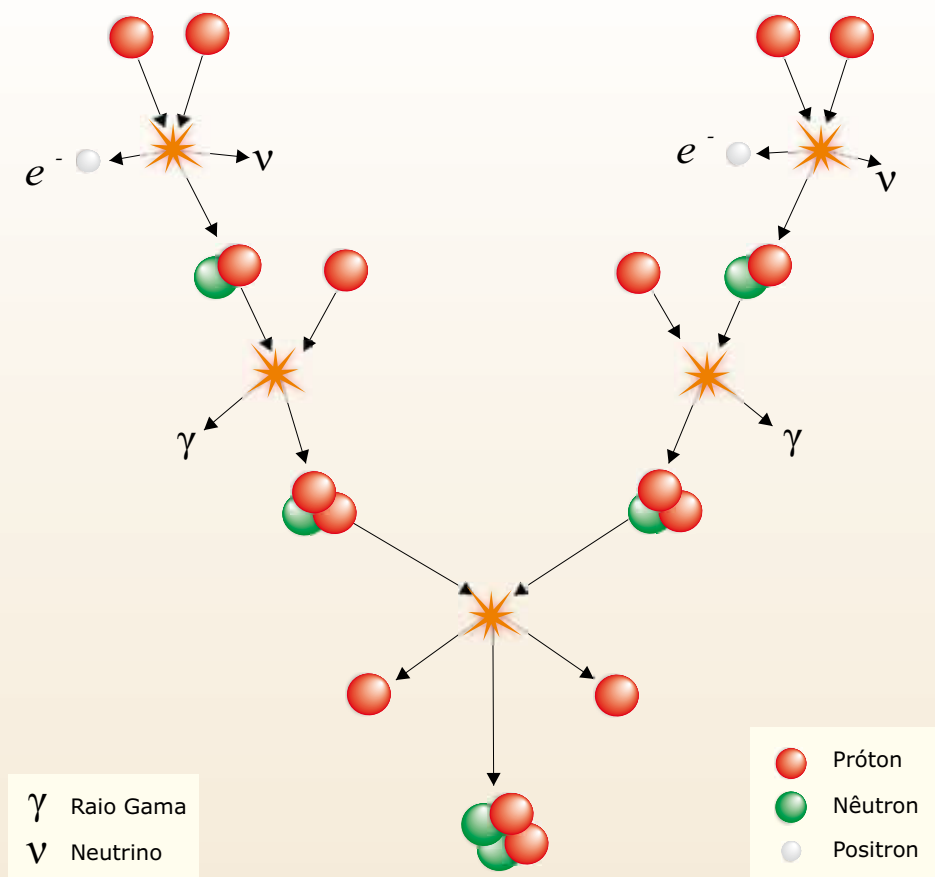
Isso aumenta o número de massa do elemento transformando-o num isótopo instável que, em seguida, se rompe, dando origem a dois outros elementos e liberando outros nêutrons, como mostra a figura a baixo.

Fusão Nuclear

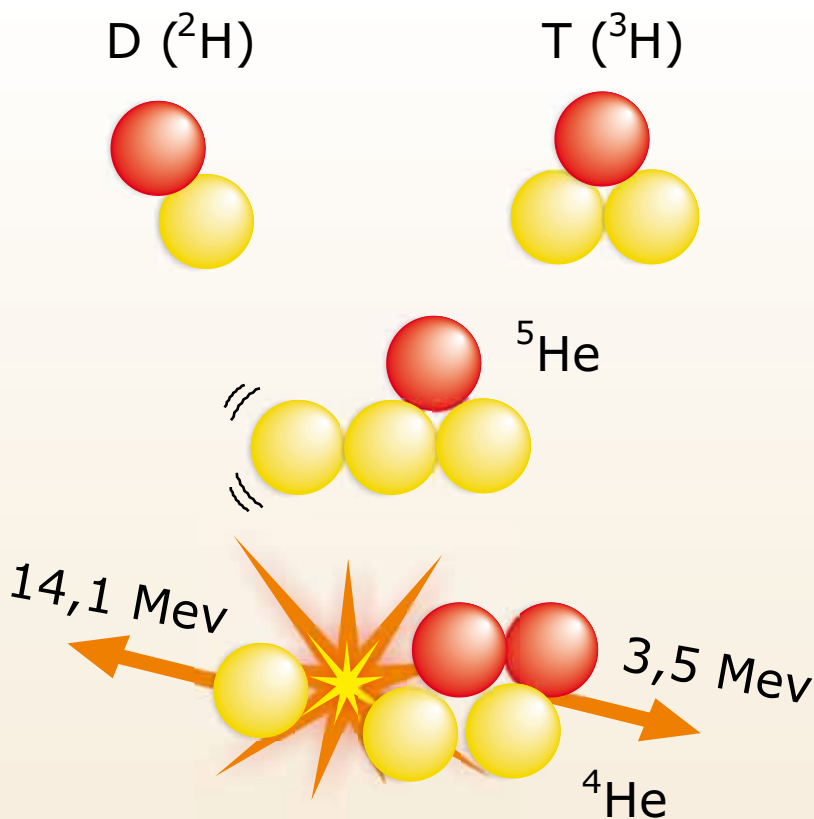
A fusão nuclear ocorre quando dois núcleos atômicos se combinam (ou se fundem) em um único núcleo. Sejam agora dois elementos: um deles se caracteriza por ter número de massa A1 e número atômico Z1, enquanto o outro tem número de massa A2 e número atômico A2.

Sua fusão nuclear é representada pela fórmula ao lado.

$$ {}_{Z1}M^{A1} + {}_{Z2}M^{A2} \longrightarrow {}_{Z}M^{A} $$

onde

$$ Z1+Z2=Z \text{ e } A1+A2=A $$

Note que agora temos o processo "inverso" da fissão nuclear: no caso da fusão nuclear, núcleos leves se combinam, criando um núcleo com maior número atômico e maior número de massa.

No processo de fusão nuclear, em geral, o núcleo resultante da combinação de dois outros núcleos atômicos é instável e após um tempo, muito curto, libera nêutrons para conseguir um estado de estabilidade. A imagem abaixo mostra a fusão nuclear de um núcleo de deutério com um de trítio, ambos isótopos do hidrogênio.

O elemento químico formado é o hélio-5, elemento instável que expulsa nêutrons, libera energia e se transforma no hélio-4, esse sim, um elemento estável.

ESTRELAS E ENERGIA NUCLEAR

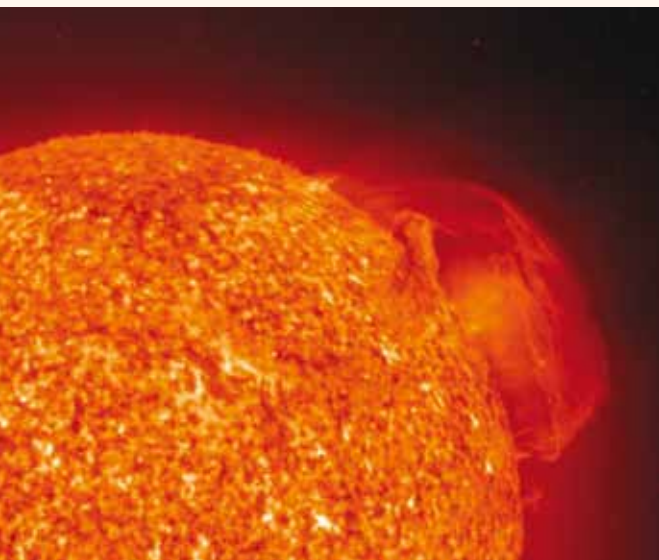
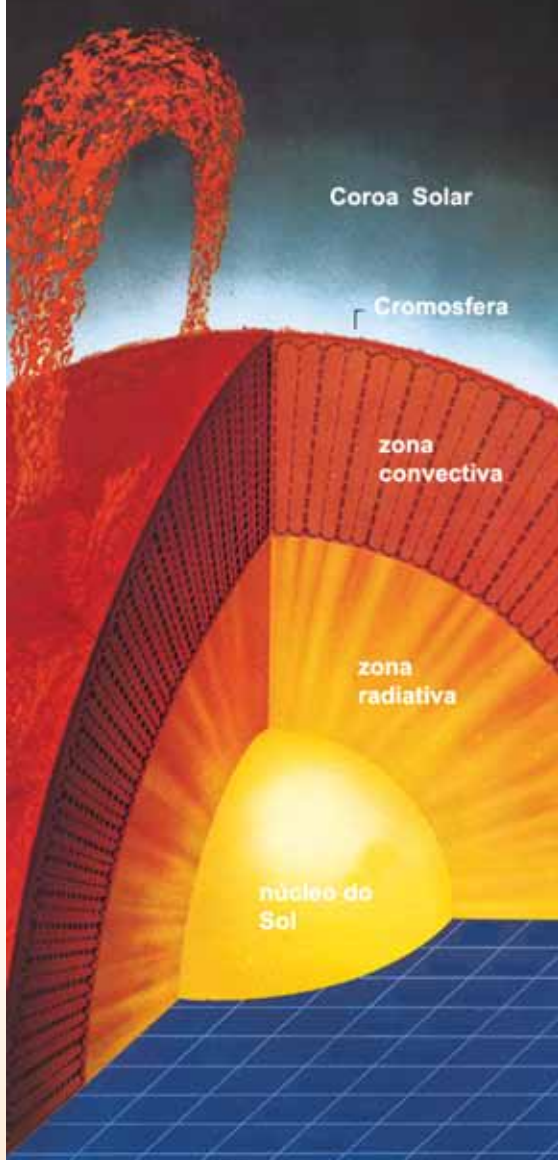
A energia emitida pelo Sol, assim como por todas as outras estrelas, é resultado de um processo nuclear que ocorre no seu interior mais profundo, na sua região central. Essa energia se desloca até a superfície da nossa estrela e, em seguida, é lançada ao espaço, que ela percorre até atingir a Terra (assim como os diversos planetas do Sistema Solar).

A energia é produzida no Sol por meio de processos de reação nuclear. Antes de discutirmos esse assunto vamos falar, um pouco, sobre a estrutura do Sol.

O Sol é apenas uma entre mais de 200 bilhões de estrelas que fazem parte da nossa Galáxia. Com um diâmetro de cerca de 1.390.000 quilômetros, o Sol tem uma temperatura de 5800º na sua superfície. No entanto, no seu centro, a temperatura atinge o fantástico valor de 15 milhões de graus centígrados

O Sol é uma estrela normal, amarelada. Na sua fase atual, 75% da massa do Sol é hidrogênio e quase 25% é hélio. Todos os outros elementos, juntos, representam apenas 0,1% da massa do Sol.

O Sol é o maior corpo de todo o Sistema Solar. Ele contém mais de 99,8% da massa total do sistema que o acompanha. A maior parte da massa restante está contida no planeta Júpiter. Devido a isso, o centro de massa do Sistema Solar, está localizado bem dentro do Sol.

O Sol não é um corpo rígido como a Terra. Por ter uma estrutura que, na sua maior parte, é gasosa, ele não gira de maneira uniforme. A superfície do Sol, na região do equador, gira uma vez a cada 25,4 dias. No entanto, próximo aos polos, a rotação diária, de sua superfície, leva cerca de 36 dias. A este tipo de rotação damos o nome de rotação diferencial. No entanto, a região central do Sol gira como um corpo sólido.

No detalhe, podemos perceber as protuberâncias solares.

Mas, como é a região central do Sol?

A região central do Sol tem apenas 347.500 km de diâmetro, cerca de 25% do tamanho total do Sol (1.390.000 km de diâmetro). Veja só que interessante: é nessa pequena região que ocorre a produção de energia nuclear da estrela e não, em todo o Sol. Não é difícil imaginar que a região central da nossa estrela é muito densa. Ali o gás hidrogênio está sendo comprimido fortemente, e as temperaturas, como já vimos, são extremamente elevadas, atingindo milhões de graus.

É aí que acontece uma das formas de reação nuclear que vimos anteriormente. Nessa região tão densa e tão quente, o gás hidrogênio, que forma a maior parte do Sol, está bastante comprimido. Nessa temperatura já é possível acontecer reações nucleares, envolvendo os átomos do hidrogênio.

Mas, qual delas?

Fusão ou fissão?

Vimos que a fissão nuclear exige que o núcleo de um átomo seja dividido em núcleos menores. Ocorre que o átomo de hidrogênio tem o menor núcleo atômico entre todos os elementos químicos existentes no universo. Seu núcleo é composto somente por um próton.

Como, então, ele poderia ser dividido em núcleos menores? Não pode! Não há como fazer isso! Concluímos que o átomo de hidrogênio não pode sofrer um processo de fissão nuclear. Resta então a fusão nuclear, essa sim é possível. Núcleos do átomo de hidrogênio podem ser reunidos e formarem outros elementos leves. Esse processo, conhecido por fusão nuclear, ocorre no interior das estrelas.

Todo processo de fusão de núcleos atômicos produz energia, e é essa energia que cruza toda a extensão do corpo da estrela e, no fim das contas, é liberada no espaço.

É por meio de processos de fusão nuclear que as estrelas geram sua energia. Mas é só isso? Um núcleo de hidrogênio se funde com outro núcleo, com outro, com outro... sempre liberando energia? Bem, existem mais coisas nesse processo de fusão nuclear e, são elas, que tiram essa "monotonia" da vida das estrelas.

Uma estrela não é um corpo formado somente por um único gás. Vimos que o Sol possui 75% de hidrogênio e 25% de hélio. Poderíamos ser levados a supor que o processo de fusão nuclear ocorreria para cada um dos elementos e pronto! Aqui temos a fusão nuclear do hidrogênio, ali a fusão nuclear do hélio, etc. Não é assim! Para que possa acontecer um processo de fusão de um determinado elemento químico, é necessário que uma certa temperatura, seja atingida no interior da estrela.

É por meio de processos de fusão nuclear que as estrelas produzem sua energia.

Você vai entender logo isso, assim que alguns pontos forem esclarecidos.

1) Em primeiro lugar, uma estrela não possui uma temperatura única.
Como vimos anteriormente, o Sol possui uma temperatura muito mais baixa na superfície do que no seu centro. Isso nos leva a concluir que, ao longo de todo o corpo do Sol, a temperatura vai diminuindo, gradualmente, do centro para a superfície. Dizemos, então, que há um "gradiente de temperatura" no interior do Sol.

2) Em segundo lugar, a fusão nuclear, para cada elemento, depende fortemente da temperatura existente.
A temperatura necessária para fazer a fusão nuclear, dos diferentes átomos, varia muito, sendo maior à medida que átomos mais pesados estão envolvidos. Assim, hidrogênio, hélio, carbono, oxigênio, silício, etc, todos possuem temperaturas de fusão diferentes.

Quanto mais pesado é um átomo, mais elevada é a temperatura necessária para fazer com que dois de seus átomos se fundam. Mais uma vez vemos que o átomo de hidrogênio por ser o elemento mais leve que existe, tem a mais baixa temperatura de fusão que conhecemos. É por esse motivo que a fusão do hidrogênio ocorre primeiro que a dos outros átomos que existem no interior de uma estrela.

Poderíamos ser levados a pensar o seguinte: "em algum lugar a temperatura é suficiente para fundir o hidrogênio, mas em algum outro lugar, ela seria necessária para fundir o hélio e assim por diante". Esse raciocínio está errado porque, primeiro, a temperatura da estrela diminui do seu centro para sua superfície. Se ela não é quente o suficiente, no seu centro para fundir o hélio, então não haverá nenhuma outra região com temperatura, suficiente, para fazê-lo. Em segundo lugar, as reações nucleares por exigirem temperaturas extremamente altas para serem realizadas, só ocorrem na região bem central da estrela, ou em finas camadas que envolvem essa região. Fora dessa região não há processos nucleares.

Vamos ver, então, como ocorre o processo de produção de energia no interior de uma estrela.

A cadeia próton-próton ou cadeia p-p

Ao caminho, ou seja, a cadeia de reações nucleares, segundo a qual o processo de fusão do hidrogênio pode ser realizado, damos o nome de "cadeia p-p". Aqui estamos chamando o núcleo do hidrogênio de "p", uma vez que ele é formado por um solitário próton.

O que isso quer dizer?

Eventualmente, o deutério pode se fundir com outro núcleo de hidrogênio. É isso que nos mostra a segunda fase: um núcleo de hidrogênio (p) reagiu com o deutério (d) e deu origem ao hélio-3 (^3He) e fótons (γ). Agora é o hélio-3 (^3He) que está em liberdade.

Lembre-se que esses processos estão acontecendo ao mesmo tempo, com inúmeros núcleos atômicos que formam o gás da região central da estrela.

A cadeia p-p pode ser descrita da seguinte forma:

1ª fase:

$$p + p \longrightarrow d + e^+ + \nu_e$$

2ª fase:

$$p + d \longrightarrow {}^3He + \gamma$$

3ª fase:

$${}^3He + {}^3He \longrightarrow {}^4He + p + p$$

A primeira fase nos informa que um núcleo de hidrogênio (p) fundiu-se (reação de fusão) com outro núcleo de hidrogênio, dando origem ao deutério "d" (que é um isótopo do hidrogênio), um antielétron e^+ (antipartícula do elétron) e um neutrino associado ao elétron (ν_e). Essas partículas ficam livres no gás que forma a região central da estrela.

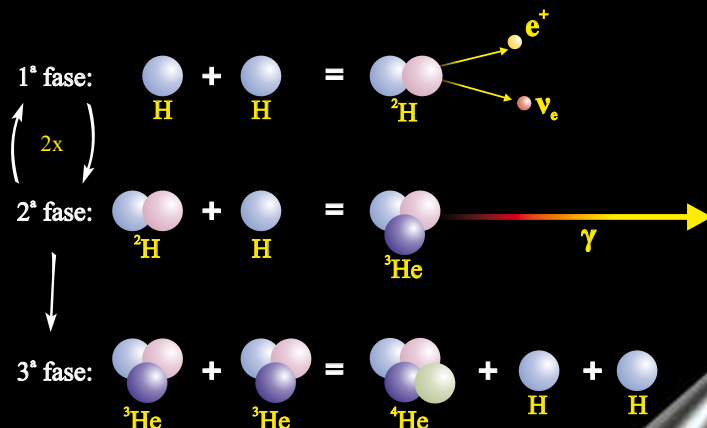
Em algum momento o núcleo de hélio-3 (^3He) se funde com um outro núcleo de hélio-3, dando origem a um núcleo de hélio-4 (^4He) e dois núcleos de hidrogênio (p + p), como mostra a terceira fase acima.

Existem alguns aspectos muito interessantes na realização da cadeia p-p. Vejamos alguns:

Veja na figura abaixo que para a realização da 3ª fase da cadeia p-p (fusão de dois átomos de ^{3}He) precisamos que as duas reações iniciais (1ª e 2ª fases) ocorram duas vezes.

Na primeira vez é produzido um átomo de ^{3}He, e na segunda vez, mais um átomo de ^{3}He. Ou seja: a estrela gasta seis prótons para realizar a 3ª fase da cadeia p-p. A 1ª fase gasta dois prótons e a 2ª fase gasta um próton.

Como essas duas fases têm que ocorrer duas vezes para produzir dois núcleos de ^{3}He, a estrela gastará seis prótons nesta produção.

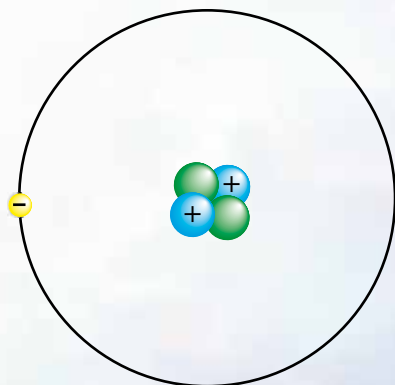
Note também que, na terceira fase da cadeia p-p, os dois átomos de ^{3}He reagem, produzindo um átomo de ^{4}He e dois prótons. Isto quer dizer que dois prótons são recuperados pela estrela. Como ela havia gasto inicialmente seis prótons para produzir os dois átomos de ^{3}He e agora "fabricou" dois prótons, vemos que, na verdade, apenas 4 núcleos de hidrogênio são gastos em cada cadeia p-p completa.

No centro de uma estrela como o Sol, que está realizando a cadeia p-p, o tempo que um átomo de hidrogênio (um próton) leva para colidir com outro átomo de hidrogênio, formando o dêuteron (d) da primeira fase desta reação, é aproximadamente 1010 anos. O Sol ainda está brilhando, pois a primeira fase da cadeia p-p é um processo muito lento. Se essa fase fosse mais rápida, o Sol já teria parado de queimar hidrogênio há muito tempo!

No entanto, a segunda fase da cadeia p-p, que ocorre entre o dêuteron (d) e o próton (p) produzindo o ^{3}He, é muito rápida. Um dêuteron, no centro do Sol, vive apenas 1 segundo antes de reagir com um próton.

Os neutrinos, ν_e, que são produzidos no interior das estrelas escapam rapidamente delas. No caso do Sol, os neutrinos produzidos na sua região central, alcançam sua superfície e saem para o meio interplanetário, em apenas 2 segundos. Note que o resultado final da cadeia p-p é o ^{4}He.

Por que as reações nucleares não continuam?

Elas param porque o ^{4}He é um elemento muito estável, a uma temperatura de 10^{7} Kelvins, que é a temperatura no centro do Sol. Nessa temperatura os átomos de ^{4}He não realizam reações nucleares.

Você pode transformar graus Celsius em temperatura Kelvin usando a expressão: t(ºC)= T(K) -273,15º).

Isótopo estável de ^{4}He

Você sabia...
...que um fóton (menor quantidade de luz) produzido no núcleo do Sol leva aproximadamente 1 milhão de anos para chegar até sua superfície (fotosfera)?

Veja alguns fatos interessantes sobre o ciclo CN.

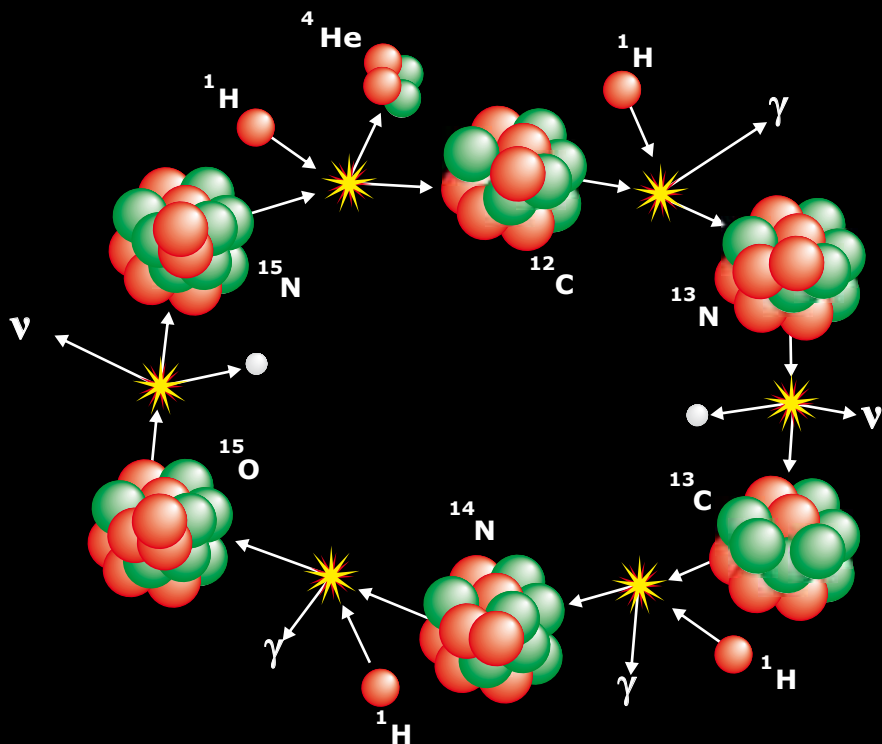
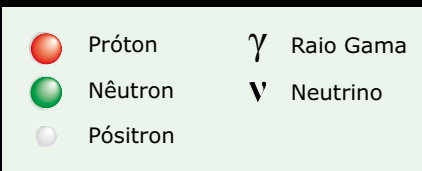
Em primeiro lugar, porque este conjunto de reações do carbono é chamado de "ciclo" e as reações nucleares de queima do hidrogênio são chamadas de "cadeia"? Veja que no caso da queima nuclear do hidrogênio, a cadeia p-p, o conjunto de reações inicia com a reação entre dois prótons (dois núcleos de hidrogênio) e apresenta um produto final completamente diferente, o ^{4}He.

No caso da queima do carbono, a reação nuclear começa com o carbono e tem como resultado final o ^{4}He e, novamente carbono. Esta é a razão pela qual chamamos este conjunto de reações nucleares de "ciclo", que é iniciado pelo carbono e produz carbono como elemento final. No caso da queima do hidrogênio o que acontece é uma "cadeia" de reações.

Mas note uma coisa interessante: o ciclo CN começa a partir de ...carbono! Isso quer dizer que o ciclo CN só acontece em estrelas que já possuem uma quantidade, razoável, de carbono no seu interior! Concluímos, então, que essa estrela foi formada a partir de gás interestelar, enriquecido pelos resíduos gasosos, lançados ao espaço pela explosão de alguma outra estrela, fenômeno esse que chamamos de formação de uma supernova.

As estrelas evoluem e produzem no seu interior elementos pesados. Quando elas explodem, esses elementos são lançados no meio interestelar e, se ela estiver próxima ou dentro de uma nuvem molecular gigante, a onda de choque, resultante desta explosão pode comprimir o gás, suficientemente, de modo a dar início ao processo de formação de novas estrelas. Como o meio interestelar foi contaminado pelos elementos pesados da estrela que explodiu, as novas estrelas terão estes elementos químicos no seu interior.

Note que, tanto a cadeia p-p como o ciclo CN, produzem ^{4}He, como elemento final das reações. Isto quer dizer que esses processos nucleares, seja a cadeia p-p ou o ciclo CN, deixarão como resíduo, no interior da estrela, um núcleo inerte de ^{4}He (inerte porque ele não tem condições de realizar reações nucleares).

Veja também que, assim como na cadeia p-p, no ciclo CN quatro prótons serão destruídos para dar origem ao carbono e ao ^{4}He final.

M_{sol} = Massa Solar

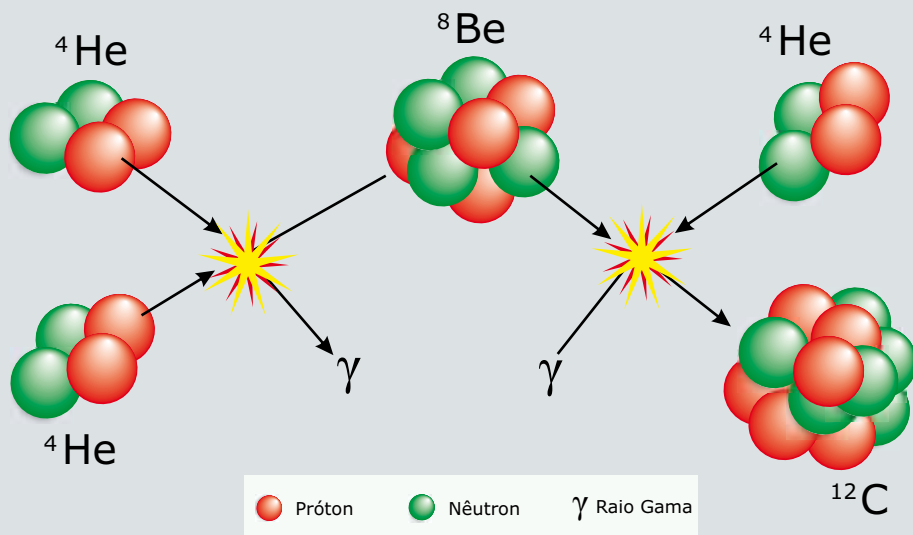
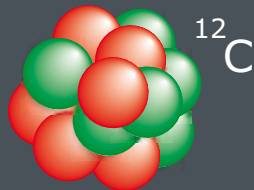
Note, também, que os dois processos nucleares, cadeia p-p e ciclo CN podem ocorrer, simultaneamente nas estrelas e, dependendo de suas massas, um deles se torna dominante. Por exemplo, para as estrelas que estão no intervalo entre 1 e 3 massas solares (M_{sol}), a fração de luminosidade, produzida pela queima nuclear no ciclo CN é de apenas alguns porcento para as estrelas com 1 M_{sol}. No entanto, para uma estrela com 1,5 massa que o nosso Sol (ou seja 1,5 massas solares), o ciclo CN já é responsável por 73% da energia produzida no centro da estrela e por, aproximadamente, metade da sua luminosidade total. Para uma estrela com 1,7 massas solares (1,7 M_{sol}), e também para aquelas com mais massa ainda, o ciclo CN claramente domina o processo de produção de energia.

A este processo nuclear que envolve o hélio damos o nome de "processo triplo-alfa".

$$^{4}He + ^{4}He + ^{4}He \longrightarrow ^{12}C + \gamma \; (7{,}5\ eV)$$

Vejamos algumas características do processo triplo-alfa:

1. Veja que essa reação nuclear envolve três núcleos de ^{4}He. Isso nos mostra que essas reações só podem ocorrer no interior das estrelas, após a fase de reações nucleares da cadeia p-p ou do ciclo CN, que produz esses elementos.

2. Por que o nome triplo-alfa? Por que "triplo" é óbvio: são três núcleos de ^{4}He que colidem para realizar a reação. O nome "alfa" vem do fato de que, os núcleos de hélio, também são conhecidos como partículas alfa.

O processo triplo-alfa é muito sensível às variações de temperatura. A taxa de produção de energia pelo processo triplo-alfa é dada por: $\varepsilon_{3\alpha} \sim T^{40}$

Isso nos diz que uma pequena variação de temperatura, irá provocar uma enorme mudança na taxa de produção de energia da estrela (como exemplo compare 2^{40} com $2,0001^{40}$ e veja a diferença. Imagine qual seria essa diferença se, em vez de 2 elevado à potência 40, você tivesse um valor de T, que corresponde a alguns milhões de graus!).

A taxa de produção de energia do processo triplo-alfa é, enormemente, maior do que aquelas apresentadas pela cadeia p-p ($\varepsilon_{pp} \sim T^{6}$) ou pelo ciclo CN ($\varepsilon_{cn} \sim T^{14}$).

Do mesmo modo como aconteceu com a transformação de hidrogênio em hélio, os resíduos da transformação de hélio, ou seja, o carbono, vão se acumulando na região central da estrela.

Ela passa a ter, agora, um núcleo de carbono inerte, pois o carbono só consegue ter reações nucleares quando a temperatura é de 10^{9} Kelvins.

E quando o hélio acaba?

Assim como aconteceu com o hidrogênio, em algum momento, o hélio existente no interior da estrela irá acabar. O que ocorre então?

Algo similar ao que foi descrito antes! Quando a quantidade de hélio diminui, de modo sensível, no interior da estrela, esta começa a contrair.

Consequentemente, o gás da estrela aquece cada vez mais, até que a região central dela atinge a temperatura necessária para dar início às reações de fusão nuclear do carbono.

Mas nesse momento a história futura da estrela vai depender muito de sua massa.

Para estudar melhor como se dá o processo de evolução das estrelas, vamos separá-las, segundo as características finais dessa evolução. Em geral, consideramos que as estrelas com massa $M < 3\ M_{sol}$, *são estrelas de pequena massa*. Aquelas com massa, no intervalo $3\ M_{sol} < M < 10\ M_{sol}$, *são estrelas de massa intermediária*. Obviamente as estrelas com massa $M > 10\ M_{sol}$ *são estrelas de grande massa*.

Estrelas de pequena massa

- Se a estrela tem uma massa M, menor do que:

$0{,}8\ M_{sol}$ $(M < 0{,}8\ M_{sol})$

Essas estrelas estão contraindo o núcleo muito lentamente.

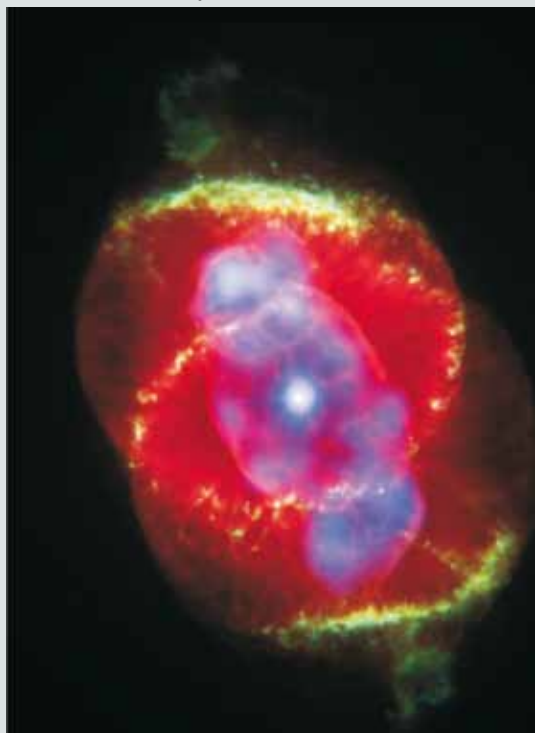
Como consequência disso, a temperatura da sua região central vai aumentando gradativamente, mas muito pouco. O gás que está nessa região vai se tornando bem mais aquecido do que aquele mais próximo à superfície.

Forma-se então, nessa região central, bolhas de gás muito aquecido, que se deslocam na direção da superfície.

São essas bolhas o principal processo de transporte de energia, entre as regiões mais centrais da estrela e a sua superfície.

Esse processo é chamado de convecção e é, em todos os aspectos, semelhante àquele que vemos quando aquecemos uma panela de água.

A superfície da estrela continua a expandir, transformando-a numa estrela gigante. Como o resultado do seu processo de expansão contínua, a estrela não consegue manter o seu envoltório e o ejeta no espaço.

O destino desse tipo de estrela é se transformar em uma nebulosa planetária.

- Se a estrela tem massa no intervalo entre:

$0{,}8\ M_{sol}$ e $3\ M_{sol}$ $(0{,}8\ M_{sol} < M < 3\ M_{sol})$

Nessas estrelas o núcleo contrai bastante e aquece. Quando a temperatura na região central dessas estrelas atingir $T \sim 10^8$ Kelvins, um novo tipo de reação nuclear, dessa vez envolvendo o hélio, irá ocorrer. Esse é o processo "triplo-alfa" discutido acima. Voltamos a lembrar que a temperatura tem que ser suficientemente grande, para que os núcleos de hélio superem a barreira elétrica repulsiva, que existe entre eles, e possam se fundir. O resultado dessa fusão é um novo elemento químico, o carbono.

Cada reação triplo-alfa libera 7,5 eV. Isso faz com que a temperatura do núcleo aumente, aumentando enormemente a taxa de produção nuclear (que depende da temperatura como T^{40} !), que libera, cada vez mais, energia de 7,5 eV, que aumenta, ainda mais, a temperatura do núcleo, que aumenta, ainda mais, a taxa de produção de energia, etc. Algumas horas, após o começo do processo triplo-alfa, há uma violenta explosão do núcleo, o processo conhecido como "flash do hélio". Embora seja uma explosão violenta, a estrela não é destruída. A explosão fica confinada à região nuclear e, como a temperatura abaixa muito, o processo triplo-alfa termina.

A partir daí, a estrela volta a se contrair até que, em um determinado momento, a temperatura no seu centro, de novo, atinge 10^8 Kelvins. Mais uma vez, tem início o processo triplo-alfa no interior da estrela só que, desta vez, como um processo controlado, queimando hélio e o transformando em carbono.

Já vimos que, do mesmo modo como aconteceu com a transformação de hidrogênio em hélio, os resíduos da transformação de hélio, ou seja, o carbono, vão se acumulando na região central da estrela. Depois de alguns milhões de anos essa estrela passa a ter um núcleo de carbono inerte, uma vez que o carbono só consegue ter reações nucleares quando a temperatura é de 10^9 Kelvins.

Em um determinado momento a estrela esgota o seu conteúdo de hélio. Acontece, então, tudo exatamente igual ao processo descrito anteriormente para a transformação de hidrogênio em hélio. A estrela, agora com uma região central de carbono sólido, se transforma em uma estrela gigante e ejeta a maior parte do seu envoltório gasoso, transformando-se numa nebulosa planetária.

Esse é o destino do nosso Sol:

Daqui a 5 x 10^9 anos, a superfície do Sol se expandirá, até quase a órbita da Terra. Em seguida o Sol ejetará a maior parte do material gasoso que o envolve, transformando-se em uma nebulosa planetaria. A parte interna da estrela ficará cada vez menor, tornando-se uma estrela Anã Branca, mais ou menos do tamanho da Terra, mas produzindo ainda algum calor. Eventualmente sua produção de energia cessará, e o Sol finalmente morrerá, tornando-se uma estrela Anã Negra, um corpo frio e escuro.

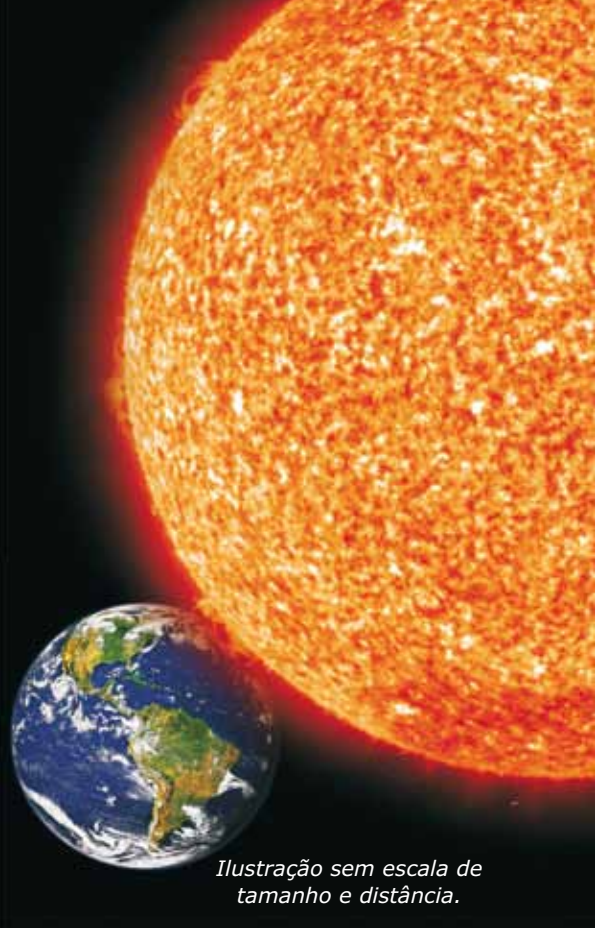



Ilustração sem escala de tamanho e distância.

Estrelas de massa intermediária

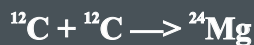
Uma estrela situada no intervalo de massa de:

$3\ M_{sol} < M < 10\ M_{sol}$, também realiza a queima do hélio, com a consequente formação de um núcleo de carbono. Só que, neste tipo de estrela, o núcleo continua a contrair e a aquecer.

Em algum momento a temperatura da região central deverá atingir a temperatura de $T \sim 10^9$ Kelvins.

Esta temperatura já é suficiente para dar início a um novo conjunto de reações nucleares envolvendo o carbono.

A queima do carbono ocorre das seguintes maneiras:

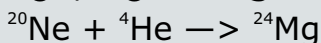
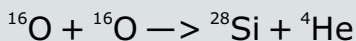
$^{12}C + ^{12}C \longrightarrow ^{24}Mg$
$^{12}C + ^{12}C \longrightarrow ^{20}Ne + ^{4}He$
$^{12}C + ^{4}He \longrightarrow ^{16}O$

A taxa de produção de energia, das reações envolvendo carbono, varia com a temperatura de uma maneira espantosa:

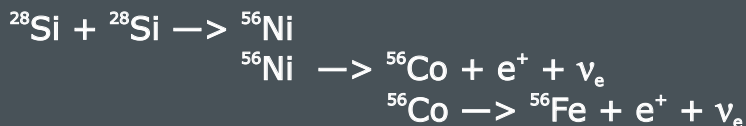
$\varepsilon \sim T^{120}$!

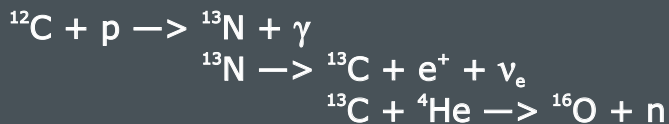
As estrelas de massa intermediária, também expulsam seus envoltórios gasosos e se transformam em nebulosas planetárias.

Estrelas de grande massa

Se a estrela tem uma massa entre **10 e 20 M_{sol}**, a temperatura do núcleo sobe, até um valor bastante alto, da ordem de $T \sim 2 \times 10^9$ Kelvins. Isto é suficiente para iniciar a queima do oxigênio e do neônio, formando silício, enxofre e magnésio.

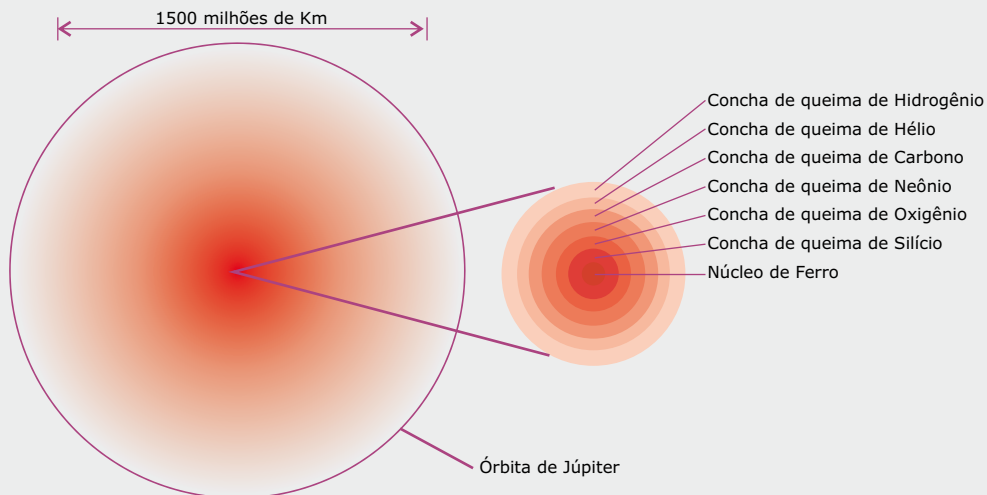
$^{16}O + ^{16}O \longrightarrow ^{28}Si + ^{4}He$
$^{16}O + ^{16}O \longrightarrow ^{32}S$
$^{20}Ne + ^{4}He \longrightarrow ^{24}Mg$

No entanto, se a estrela tem uma massa maior do que 20 M_{sol} a temperatura do núcleo alcança T ~3 x 10^9 Kelvins o que permite a queima do silício.

$$^{28}Si + {}^{28}Si \longrightarrow {}^{56}Ni$$
$$^{56}Ni \longrightarrow {}^{56}Co + e^+ + \nu_e$$
$$^{56}Co \longrightarrow {}^{56}Fe + e^+ + \nu_e$$

A cadeia termina quando o ^{56}Fe é produzido. No entanto, acontece algo muito importante durante estes processos nucleares.
A partir de reações tais como:

$$^{12}C + p \longrightarrow {}^{13}N + \gamma$$
$$^{13}N \longrightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu_e$$
$$^{13}C + {}^{4}He \longrightarrow {}^{16}O + n$$

Um número muito grande de nêutrons é produzido, e liberado no interior da estrela. Esses nêutrons se combinam com vários átomos, formando isótopos pesados desses elementos. Acontece que os núcleos, ricos em nêutrons, são instáveis e decaem para estados de menor energia. O importante é entender que esse é o processo de formação, dos elementos pesados, que encontramos em todo o Universo.

Todos os elementos pesados que existem no Universo foram fabricados no interior de alguma estrela gigante ou supergigante. Quando estas estrelas evoluem e explodem, esses elementos são lançados no meio interestelar, enriquecendo as nuvens de gás e poeira que dão origem à geração seguinte de estrelas.

Devido à contínua queima de elementos nucleares, a estrutura interna destas estrelas de grande massa, é formada por conchas concêntricas, de elementos cada vez mais pesados, assemelhando-se a uma "repugnante" cebola.

Nosso corpo é formado por carbono, um elemento pesado que foi fabricado no interior de uma estrela. Existimos porque, em algum momento, uma estrela, localizada nesta vizinhança, explodiu e lançou este material pesado no gás que, mais tarde, daria origem ao Sol e ao sistema planetário que o acompanha.

Elemento que sofre a queima nuclear	Elementos que são produzidos nesta queima nuclear	Temperatura mínima para ocorrer a reação nuclear (em Kelvins)	Massa que a estrela deve ter para iniciar a fusão nuclear	Duração da fusão nuclear
H	He	4×10^7	0,1 M_{sol}	7×10^6 anos
He	C, O	2×10^8	0,4 M_{sol}	5×10^5 anos
C	Ne, Na, Mg, O	6×10^8	4 M_{sol}	600 anos
Ne	O, Mg	$1,2 \times 10^9$	~ 8 M_{sol}	1 ano
O	Si, S, P	$1,5 \times 10^9$	~ 8 M_{sol}	~ 0,5 ano
Si	do Ni ao Fe	$2,7 \times 10^9$	~ 8 M_{sol}	~ 1 dia

Conhecemos várias estrelas de grande massa, tais como, Antares e Betelgeuse mostradas a seguir.

Betelgeuse

Antares

Ao contrário das estrelas de pequena massa e de massa intermediária, as estrelas de grande massa não formarão nebulosas planetárias, no final de sua existência. Seu destino é sofrer uma violenta explosão, dando origem a uma supernova. Algumas deixarão como resíduo, uma estrela de nêutrons ou um buraco negro. Outras serão totalmente destruídas, nada restando delas, a não ser seu gás que, agora, enriquece o meio interestelar.

Essa é uma descrição, bem resumida, dos processos de fusão nuclear que ocorrem nos interiores estelares e que determinam o destino final das estrelas.

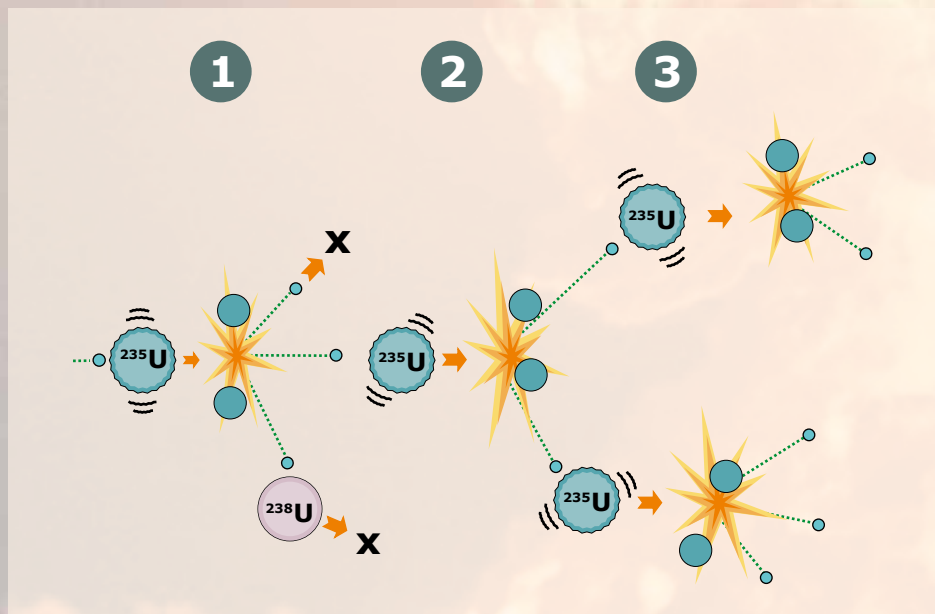
É esse processo que acontece em uma usina nuclear terrestre?

Nas usinas nucleares, a energia é obtida por um processo diferente daqueles que descrevemos acima e que ocorrem no interior das estrelas. Vimos que, em uma estrela, o processo de produção de energia nuclear é a fusão nuclear, a partir do núcleo mais leve existente: o núcleo do átomo de hidrogênio.

Nas usinas nucleares, a produção de energia é feita, a partir do processo de fissão nuclear, ou seja, energia que é liberada quando um núcleo atômico é fragmentado. Esse processo foi descoberto pela cientista austríaca, Lise Meitner, e pelo físico alemão, Otto Hanh, em 1938. Veja como era o laboratório onde foi feita, pela primeira vez, a divisão de um átomo.

Para realizar a fissão de um núcleo atômico, é necessário usar átomos que possuam grandes núcleos. Isso levou, os cientistas, a utilizarem átomos de urânio e de plutônio.

Nos reatores nucleares, o combustível é o urânio, na forma de dois isótopos: urânio 235 e urânio 238. Quando ocorre a colisão de um nêutron com um átomo de urânio 235, seu núcleo sofre fissão, dividindo-se em dois núcleos menores, e liberando antineutrinos e uma enorme quantidade de energia. Quando o urânio 238 captura nêutrons ele, algumas vezes, forma urânio 239, que decai formando plutônio 239, também uma fonte de antineutrinos. O problema com o processo de fissão é que, como cada núcleo de urânio rompido libera nêutrons, logo você tem uma série de fissões nucleares ocorrendo em todos os átomos de urânio presentes.

A essa sequência de processos de fissão, que ocorrem de modo descontrolado, liberando enormes quantidades de energia de modo súbito, damos o nome de reação em cadeia.

Inicialmente, quando começaram as pesquisas sobre energia nuclear, todo o problema se resumia em saber como controlar o processo de fissão, ou seja, controlar a energia liberada por cada rompimento de núcleo atômico.

A ameaça nuclear: bombas nucleares

No dia 2 de dezembro de 1942, em uma quadra de squash, situada abaixo do estádio de futebol da Universidade de Chicago, Estados Unidos, o físico italiano Enrico Fermi, e seus colaboradores conseguiram, pela primeira vez, controlar e manter, de forma auto-sustentada, um processo de reação nuclear em cadeia. Surgiu, assim, o primeiro reator nuclear artificial, o "Chicago Pile-1", uma grande "pilha atômica" formada por tijolos de grafite e tendo, como combustível nuclear o urânio.

Neste ano, o mundo passava pela Segunda Guerra Mundial. A partir de uma carta enviada, pelo físico Albert Einstein para o presidente dos Estados Unidos, todos os esforços norte-americanos no estudo da energia nuclear foram voltados para a construção de algum tipo de artefato militar, que utilizasse a energia liberada em um processo de fissão nuclear. Isso eles conseguiram e, infelizmente, o primeiro uso da energia nuclear foi em uma guerra.

No dia 16 de julho de 1945, em um local desértico, 56 quilômetros a sudeste da cidade de Socorro, estado do Novo México, Estados Unidos, foi detonado, pela primeira vez, um artefato nuclear artificial. Este foi o chamado "teste nuclear Trinity", a explosão de um artefato nuclear de plutônio, que liberou uma energia equivalente à explosão de cerca de 20 mil toneladas de TNT.

O primeiro uso de um artefato nuclear em um alvo militar ocorreu no dia 6 de agosto de 1945, quando os norte-americanos lançaram, sobre a cidade japonesa de Hiroshima uma bomba nuclear, apelidada de "Little Boy" ("Garotinho").

Bomba Nuclear conhecida como "Little Boy" ("Garotinho").

O poder explosivo dessa bomba foi obtido a partir da fissão nuclear do urânio 235. Essa foi a segunda explosão nuclear, artificial, na história da humanidade e, a primeira, que usou urânio como elemento detonador: ela continha 64 kg de urânio, dos quais 0,7 kg sofreram fissão nuclear e, dessa massa, somente 0,6 g foi transformada em energia, liberando uma potência destrutiva, entre 13 e 16 mil toneladas (quilotons) de TNT!

Três dias depois, em 9 de agosto de 1945, mais uma bomba nuclear, agora usando plutônio 239, foi lançada pelos norte-americanos sobre outra cidade japonesa, Nagasaki. Essa arma nuclear, conhecida como "Fat Man" ("Homem Gordo").

Nagasaki após ao ataque norte-americano.

O resultado foi a morte, imediata, de cerca de 140 mil pessoas.

Bomba nuclear, conhecida como "Fat Man" ("Homem Gordo").

O mundo assistiu, horrorizado, uma única bomba matar cerca de 39000 pessoas e deixar feridas, mais 25000. Milhares de pessoas morreriam mais tarde em virtude da violência da explosão e queimaduras, ao mesmo tempo em que, centenas de pessoas, morreriam de doenças associadas à exposição à radiação.

Após esses holocaustos nucleares, o mundo entrou em uma imensa paranóia em relação à energia nuclear. Para muitas pessoas, energia nuclear passou a ser sinônimo de mal.

Esse pavor foi ainda mais alimentado, quando as pessoas tomaram conhecimento de que as duas maiores potências militares da época, Estados Unidos e União Soviética, possuíam armas nucleares, capazes de dizimar praticamente toda a humanidade, fosse pela explosão direta desses artefatos ou pelas consequências, nefastas, da radiação que impregnava os locais onde ocorriam essas explosões.

No entanto, energia nuclear não é sinônimo de destruição, assim como, pólvora não é sinônimo de terrorismo! A energia nuclear pode ser usada para o bem da humanidade, produzindo energia elétrica, permitindo o avanço da medicina nuclear, etc. Tudo isso passou a ser possível com o uso de reatores nucleares, onde as reações que ali ocorrem são controladas pelo ser humano.

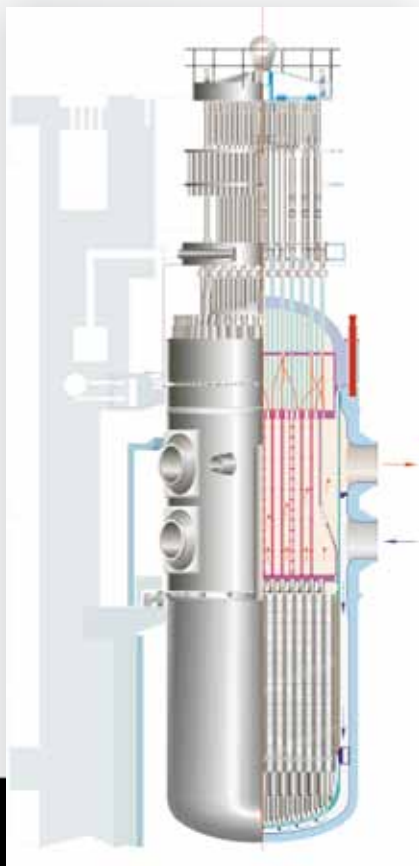
Como funciona um reator nuclear de fissão

Para que um reator nuclear de fissão possa funcionar, é necessária uma complexa estrutura industrial.

A alma de um reator nuclear está no desenvolvimento do chamado “ciclo de combustível nuclear”. Esse ciclo é uma série de processos industriais caros, longos e que envolvem grande desenvolvimento tecnológico. Seu objetivo é produzir o urânio enriquecido, usado nos reatores nucleares.

Tudo começa com a extração do minério de urânio, de uma mina. Esse minério é então concentrado, sob a forma de pó composto por óxidos de urânio, de forte cor amarela e que é chamado de “yellowcake”. Nessa forma natural ele contém, principalmente, dois tipos de átomos de urânio (dois isótopos): U235 e U238.

O U235 é fissel e, por conseguinte, sua energia nuclear pode ser aproveitada em um reator, enquanto que o U238 não pode.

O problema é que o urânio natural é formado por 99,3% de U238 e somente 0,7% de U235. Por esse motivo, é necessário “enriquecer” o urânio.

WWER-1000 (Water-Water Energetic Reactor, força elétrica de 1000 megawatt) é um reator russo de energia nuclear do tipo PWR (Reatores de água a pressão)

A maioria das usinas nucleares usa como combustível urânio com baixo enriquecimento, tipicamente 3 a 5% de U235.

Bombas nucleares são, normalmente, fabricadas com urânio altamente enriquecido contendo, pelo menos, 90% de U235.

Para enriquecer o urânio você precisa primeiro converter a "yellowcake" em um gás tóxico e altamente corrosivo, chamado hexafluoreto de urânio.

Depois disso é que vem o enriquecimento propriamente dito, ou seja, a separação do U235 útil. Conhecemos hoje menos de 10 métodos de enriquecimento de urânio. Desses, apenas dois são usados em escala comercial: a difusão gasosa e as centrífugas. No processo de difusão gasosa, a separação é feita bombeando-se o gás em câmaras divididas por membranas de metais porosas, através das quais o U235 se difunde, levemente, mais rapidamente.

No processo de centrífugas, o gás é injetado em um cilindro que gira, a incrível velocidade de 90 000 rotações por minuto.

A força centrífuga empurra o U238 para mais próximo da parede do rotor, enquanto que o U235, ligeiramente mais leve, tende a se reunir mais próximo ao centro.

Cascatas da centrífuga de urânio.

Por meio de variações de temperaturas, ao longo do rotor, frações do U238 e do U235 circulam e fluem para dentro de cavidades. Cada centrífuga aumenta a concentração de U235 por apenas uma pequena fração de modo que milhares de máquinas precisam ser ligadas em cascata.

As centrífugas revolucionaram o enriquecimento do urânio, por exigirem equipamentos mais baratos, menos energia e menos espaço do que a difusão.

Foi o cientista austríaco, Gernot Zippe quem inventou a moderna centrífuga de urânio, ao projetar um equipamento no qual um suporte de metal, semelhante a uma agulha, apoiava o rotor na parte de baixo, enquanto um conjunto de magnetos mantinha o topo do rotor estável.

Depois do enriquecimento, o próximo estágio no ciclo é a fabricação do combustível nuclear. O hexafluoreto de urânio, agora mais rico em U235, é transformado em dióxido de urânio, um pó escuro que é então comprimido em pequenos discos. Esses são colocados em longos tubos de metal, que formam o "coração nuclear" de um reator.

À medida que o combustível é usado no reator, o U235 concentrado é esgotado e deve ser substituído. O combustível gasto pode ser enviado para um local de armazenamento permanente ou, então, pode ser reprocessado.

O reprocessamento separa o U235 que não sofreu fissão (e há uma grande quantidade dele) e retorna esse material ao estágio de enriquecimento para se tornar de novo combustível nuclear. Subprodutos do reprocessamento incluem o plutônio, em particular, um dos seus isótopos Pu239, uma alternativa ao urânio altamente enriquecido na fabricação de bombas nucleares.

Uma pastilha de urânio altamente enriquecido.

Precisamos de energia nuclear?

Certamente sim.

A energia nuclear é tão perigosa quanto qualquer outra forma de energia, usada de modo irresponsável. Hoje, tendo consciência de que os combustíveis fósseis (petróleo, carvão), além de poluirem a atmosfera, um dia se esgotarão, devemos voltar nossos olhos para a energia nuclear.

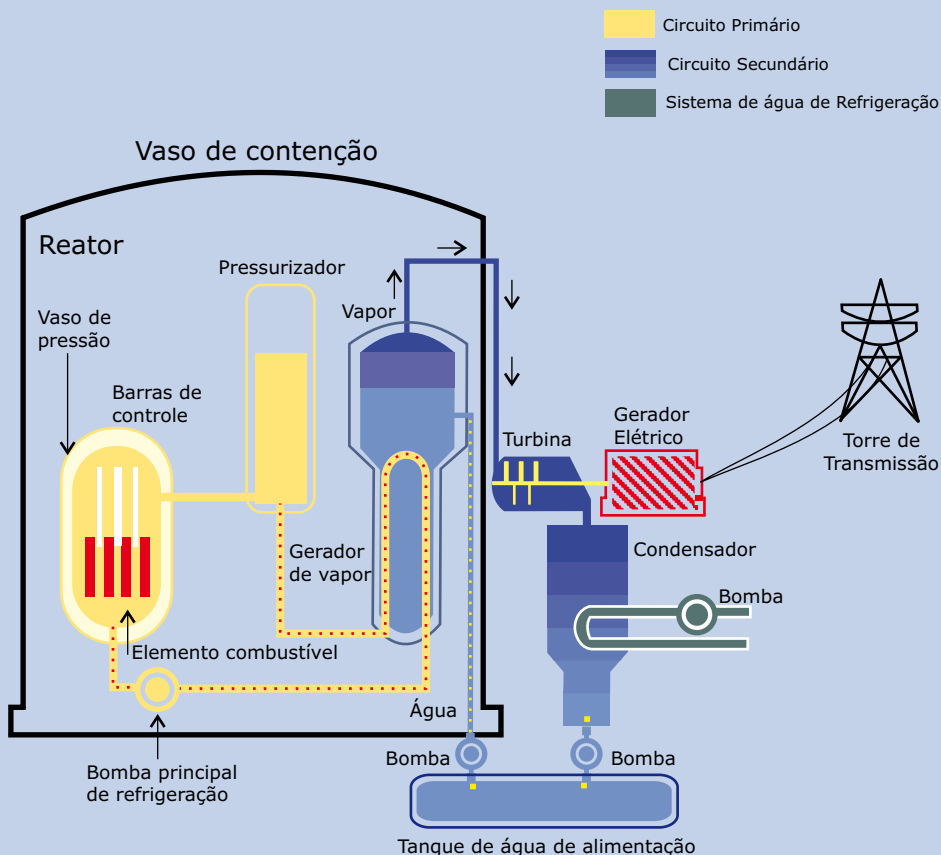
As usinas nucleares produzem grandes quantidades de energia elétrica e são fatores, fundamentais, em um mundo cada vez mais ávido por energia.

O consumo de eletricidade no Brasil cresceu muito desde 1990. O consumo "per capita" é de 2235 kWh/ano. A energia nuclear fornece 3% da eletricidade do país, cerca de 13 bilhões de kWh por ano. A energia hidroelétrica fornece 92% do total, mas hoje é criticada por alterar o clima local e exigir a criação de imensos reservatórios (os chamados "lagos de represa"), que destroem grandes regiões de mata virgem e até mesmo cidades já existentes, causando problemas sociais com a remoção de seus habitantes.

No Brasil temos, somente, duas usinas nucleares em operação, as usinas Angra I e Angra II instaladas na praia de Itaorna, na região de Angra dos Reis, no litoral sul do estado do Rio de Janeiro. A usina Angra I fornece 657 megawatts (MWe) de energia elétrica e Angra II fornece 1350 Mwe. Desse modo, elas contribuem com 4,1 porcento da eletricidade do nosso país.

A companhia que opera os reatores nucleares, estabelecidos em Angra dos Reis, é a Eletronuclear, (Eletrobrás Termonuclear S/A), subsidiária da Eletrobrás.

Hoje o Brasil ainda envia o seu urânio para ser enriquecido em países da Europa, mas fazendo esse enriquecimento em nosso país, esperamos economizar, pelo menos, 12 milhões de dólares por ano.

Recentemente o governo brasileiro reviu seu programa nuclear. Um, possível, novo cenário seria completar o reator Angra-3, que geraria 1300 MWe, e construir um novo reator de 1300 MWe e dois outros, de 300 MWe, esses últimos projetados no nosso país. Com essa série de reatores nucleares fica, mais que justificado, o Brasil fabricar seu próprio combustível nuclear.

Esse é o esquema de funcionamento da usina nuclear Angra II.

Com a inauguração de um centro de centrífugas voltadas para o enriquecimento de urânio na cidade de Resende, próxima ao Rio de Janeiro, o Brasil possui, agora, domínio sobre todos os estágios de produção de combustível nuclear, desde a mineração e processamento do minério de urânio, no concentrado conhecido como "yellowcake", até a fabricação de pastilhas de dióxido de urânio que preenche as barras que formam o núcleo de um reator nuclear.

Essas centrífugas, que usam 100% de tecnologia nacional, foram desenvolvidas pela Marinha de Guerra do Brasil, que as fabrica e as instala em Resende, para as Indústrias Nucleares Brasileiras (INB).

O desenvolvimento tecnológico do Brasil, no campo da energia nuclear, despertou "preocupações" nos auto-intitulados países desenvolvidos. Aliás, todo o trajeto do nosso país, na procura de auto-suficiência nuclear, foi pontilhado por pressões, cada vez mais acirradas feitas pelos países do Hemisfério Norte. Até mesmo a construção das usinas nucleares não foi algo tranquilo.

Em 1971 o Brasil comprou, da companhia norte-americana Westinghouse Electric Corporation, seu primeiro reator nuclear, o Angra I.

Temendo se tornar extremamente dependente dos norte-americanos, nesse setor estratégico, e já conhecendo o cerceamento que eles davam, a qualquer desenvolvimento nuclear fora de sua jurisdição, nosso país procurou parceria com a Alemanha, na época Alemanha Ocidental.

Em 1975 foi assinado um acordo entre o Brasil e a Alemanha Ocidental, que incluía a construção de oito reatores, cada um capaz de produzir 1300 MWe de energia elétrica, em 15 anos.

Vista aérea da Unidade da INB na cidade de Resende/RJ.

"Yellowcake"

Pastilhas de Dióxido de Urânio.

Além disso, o acordo previa a transferência, completa, da tecnologia necessária, para o desenvolvimento de uma indústria do ciclo de combustível nuclear. A pressão contra esse acordo, feita pelos Estados Unidos, foi enorme e o Brasil foi obrigado a colocar suas instalações nucleares sob controle internacional. Isso acabou sendo desnecessário pois na década dos anos de 1980, nosso país mergulhou em grande crise econômica e só o reator Angra 2, incluído no acordo, foi construído. Além disso, o processo de enriquecimento de urânio, cedido pelos alemães, o "jet-nozzle", mostrou não ser viável economicamente.

Um pouco antes disso, o governo militar existente no Brasil, vendo as dificuldades que se agigantavam, impedindo o desenvolvimento nuclear do país, decidiu investir em um programa nuclear, que não dependeria de tecnologia estrangeira e não estaria restrito por salvaguardas internacionais.

Embora desenvolvido por militares das três forças (Exército, Marinha e Aeronáutica), esse programa não tinha como objetivo a fabricação de armas nucleares.

Foi o programa, desenvolvido pela Marinha que obteve mais êxito. Seu objetivo era desenvolver um reator nuclear, compacto, que pudesse ser usado em um submarino, assim como, o desenvolvimento de tecnologia de enriquecimento de urânio que, para esse propósito, seria difícil de ser adquirido no exterior. Esse programa ficou conhecido com o nome de "Projeto Ciclone" e foi liderado pelo oficial da marinha, Othon Luiz Pinheiro da Silva.

Piscina de combustível usada em Usinas Nucleares.

Após um estágio no MIT, nos Estados Unidos, ele trouxe para nosso país a idéia de que, o enriquecimento de urânio, deveria ser feito por um processo que utilizava centrífugas.

No dia 8 de setembro de 1982, da Silva e seu grupo, usando uma única centrífuga, realizaram a primeira experiência de enriquecimento, com sucesso no nosso país. Em 1987, já havia um conjunto de 48 centrífugas e, em 1991, elas chegavam a cerca de 500.

Isso despertou suspeitas nos Estados Unidos que, segundo a revista norte-americana Spectrum, do IEEE, com base em um documento secreto da Marinha Brasileira, decidiram manter esse programa sob vigilância cerrada tendo até mesmo designado agentes americanos, baseados em São Paulo, para seguir da Silva o tempo todo.

A pesquisa com as centrífugas continua a ser feita no Centro de Tecnologia da Marinha em São Paulo (CTMSP), enquanto sua fabricação ocorre no Centro Experimental Aramar, da Marinha, localizado em Iperó, São Paulo.

A partir dos anos da década de 1980, com a mudança para governos civis, o programa nuclear brasileiro sofreu grandes modificações. Pela Constituição, aprovada em 1988, o Brasil só pode usar energia nuclear, para fins pacíficos.

Várias partes do programa nuclear brasileiro foram integradas ao Ministério de Ciência e Tecnologia. Em 1997, o Brasil assinou o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares e permitiu a inspeção, pela IAEA, de todas as suas indústrias nucleares, incluindo o complexo de Aramar pertencente à Marinha.

Em 1991, Brasil e Argentina assinaram um acordo, no qual, se comprometiam a não fabricar bombas nucleares e a estabelecer uma agência de inspeção nuclear mútua.

Mesmo agora, com o Brasil signatário do Tratado de Não Proliferação Nuclear, ainda são fortes as pressões sobre o Governo Brasileiro, com o objetivo de desmantelar nossa indústria nuclear.

Alguns "observadores" internacionais sentem ameaça no programa de enriquecimento de urânio desenvolvido no nosso país, e declaram que, o mundo não deve aceitar o funcionamento da indústria de enriquecimento, instalada em Resende, e que o governo brasileiro deve ser pressionado a fechar essa fábrica.

A alegação deles: se o Brasil faz, outros países também vão querer fazer! O Brasil se protege alegando que, o próprio Tratado de Não Proliferação, no seu artigo IV, garante que os países signatários têm o direito de explorar a energia nuclear para propósitos pacíficos, incluindo o desenvolvimento do ciclo de combustível nuclear.

Em 2004, os Estados Unidos começaram a falar em mudanças nas regras do tratado, de modo a impedir que outros países desenvolvam a indústria nuclear. Segundo eles, devia ser proibida a disseminação da tecnologia de reprocessamento e enriquecimento nuclear.

Países que ainda não produzem combustível nuclear deveriam ser proibidos de desenvolver essa capacidade tecnológica.

Elemento combustível

Bocais

Montagem

Uma alta autoridade, da Agência Internacional de Energia Nuclear (IAEA), propôs uma moratória de cinco anos sobre novas indústrias de reprocessamento e enriquecimento, declarando que, durante esse período, a IAEA forneceria o material físsil necessário para o funcionamento de usinas nucleares civis, através de fornecedores que ela autorizasse, e a preços de mercado! O ridículo dessa proposta está no fato de que, o Brasil logo estará produzindo urânio enriquecido em escala industrial, suficiente para abastecer seus dois reatores nucleares. O Brasil possui a oitava reserva mundial e o enriquecimento dará ao nosso país autonomia de combustível nuclear.

A segunda razão pela qual essa proposta é risível, é o fato econômico que está por trás dela. Preocupados com o aumento dos preços do petróleo e com as emissões de gás, que provoca o efeito estufa, parece haver um renascimento da necessidade de gerar energia por processos nucleares. Isso mostra que em pouco tempo haverá um substancial aumento na demanda por serviços de enriquecimento de urânio. Cerca de 90% dos reatores nucleares, de todo o mundo– 397 de um total de 441 – dependem de serviços de enriquecimento para obter seu combustível. Esse é um mercado global de mais de cinco bilhões de dólares por ano, algo não desprezível, que o nosso país pretende participar no futuro. Segundo a INB, o Brasil pretende produzir de 20 a 30 toneladas métricas de urânio enriquecido por ano, ou seja, 60% do combustível doméstico que necessitamos, por volta de 2008 ou 2009 alcançando 100%, por volta de 2010.

Na imagem, podemos ver o urânio em seu estado natural e suas pastilhas, depois do seu enriquecimento.

Onde está o urânio do mundo?

(dados de 2003)

País	Milhares de toneladas métricas de urânio	Percentagem mundial
Austrália	989	28
Cazaquistão	561	16
Canadá	438	12
África do Sul	299	8
Nigéria	228	6
Namíbia	213	6
Rússia	158	5
Brasil	143	4
Estados Unidos	102	3
Uzbequistão	91	3
Outros países	315	9
Total	3537	100

COPYRIGHT

A história da energia nuclear no Brasil foi tirada da revista eletrônica Spectrum: The Institute of Electrical and Electronics Engineers ou IEEE. Essa organização, internacional, procura divulgar o avanço da tecnologia relacionada com a eletricidade. Ela possui mais de 365 000 membros, espalhados em 150 países. Sua sede é em Nova Iorque, Estados Unidos.

Todas as imagens usadas nesta publicação são propriedade de alguma organização e/ou instituição científica. Agradecemos a todas elas, abaixo relacionadas:

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Estados Unidos)
European Space Agency (ESA) (Comunidade Européia)
European Southern Observatory (ESO) (Comunidade Européia)
National Science Foundation (NSF) (Estados Unidos)
Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) (Estados Unidos)
Jet Propulsion Laboratory (JPL) (Estados Unidos)
National Optical Astronomy Observatory (NOAO) (Estados Unidos)
Space Telescope Science Institute (STScI) (Estados Unidos)
Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Estados Unidos)
Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) (NASA – ESA) (Estados Unidos – Comunidade Européia)
Hubble Space Telescope (NASA – ESA) (Estados Unidos – Comunidade Européia)
United States Geological Survey (USGS) (Estados Unidos)
Cerro Tololo Interamerican Observatory (CTIO) (Estados Unidos)
Two Micron All-Sky Survey (2MASS) (Estados Unidos)
W. M. Keck Observatory (Estados Unidos)
Laboratório Nacional de Oak Ridge (Estados Unidos)
Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) (Alemanha)
Mount Palomar Observatory (Estados Unidos)
Mount Wilson Observatory (Estados Unidos)
Yerkes Observatory (Estados Unidos)
Spitzer Telescope (Estados Unidos)
National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) (Japão)
Very Large Telescope (VLT) (ESO) (Comunidade Européia)
Museum of the History of Science - University of Oxford (Inglaterra)
Observatório Nacional (Brasil)
INB - Indústrias Nucleares do Brasil (Brasil)